

# 基于多层递阶回归方法的裂隙水资源评价

方燕娜<sup>1</sup>, 廖资生<sup>2</sup>, 平建华<sup>3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 吉林大学水资源与环境研究所, 吉林 长春 130026;  
3. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**裂隙地下水在我国许多城市和工矿企业供水中有着重重要的作用。在地下水流态复杂、含水介质不均一地区, 当具有系统动态观测资料时, 多宜采用随机模型方法。考虑到地下水是一种时空变化的动态系统, 以往用于地下水位预测和资源计算的数理统计方法均为固定参数模型, 不免影响了计算结果的可靠性。而多层递阶回归方法, 是针对时空动态系统而言的, 模型中的参数是随时间变化的, 能很好的反映出系统动态变化情况。以吉林省四平市为例, 阐明了多层递阶回归方法在白垩系孔隙裂隙水允许开采量计算中的应用, 为区域水资源优化管理提供科学依据, 也为裂隙水资源评价提供一定的借鉴。

**关键词:** 多层递阶回归方法; 地下水允许资源量; 动态时变系统; 白垩系孔隙裂隙水

**中图分类号:** P641.2 **文献标识码:** A

## Application of Multi-level Recursive Regression Method in Fracture Water Resource Assessment

FANG Yan-Na<sup>1</sup>, LIAO Zi-sheng<sup>2</sup>, PING Jian-hua<sup>3</sup>

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130026, China;

3. College of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Fracture water plays an important role in municipal, industrial and mining enterprise water supply. The stochastic models are appropriate for the area with complex flow pattern, inhomogeneous aquifer medium and abundant groundwater level data. The groundwater system can be assumed as a time-space variation system. The former mathematical statistic method with fixed-parameters, which decreases the reliability of results, while the multi-level recursive regression method is just the one dealing with the time-space variation system, the parameters of model is time-varying. The paper introduces the application of multi-level recursive regression method in the cretaceous porous-fractured aquifer allowable withdrawal calculation. The results will offer some scientific advices on planning water use in the future, and can be used for reference to the fracture water resource assessment.

**Key words:** multi-level recursive regression method; assessment of groundwater allowable withdrawal; time-varying dynamic systems; cretaceous porous-fractured aquifer

## 0 引言

山区和丘陵区的面积约占我国总面积的 3/4。许多城市和工矿企业利用基岩的裂隙水、孔隙-裂隙水和岩溶-裂隙水作为供水水源。所以对这种类型的地下水开采资源进行评价, 有重要的现实意义。

裂隙介质的渗透性具有很强的非均质性和各向异性。组成裂隙介质的基岩, 往往岩性有较大的差异, 裂隙发育的程度很不

相同。因而渗透系数有相当大的差别。在一个计算区域内往往可划分出许多非均质区。非均质区之间的导水系数  $T$  或渗透系数  $K$  可以相差数百倍。因为岩层的展布是有方向性的, 构造裂隙的分布也有方向性的, 往往造成渗透性的各向异性。

处于地下水开采状况下的区域, 其地下水系统是时空的变动系统, 系统环境中的各种因素均是随时间变换的量。目前应用于地下水资源评价的各种统计方法, 其共同点是用固定参数模型来预报动态时变特性, 这样必然会产生一定的误差。多层

递阶回归方法<sup>[1-3]</sup>是针对时空动态系统而言的,它摒弃了数理统计方法中的固定参数预报模型,将预报对象看成是随机动态的时变系统,把动态系统的状态预报分为两部分,即对系统的时空参数的预报和在此基础上对系统状态的预报。而且对所选用的预报因子间存在较大的量级差异时,首先将各回归变量作线性回归,再以回归系数与预报因子的乘积作为对原预报因子的修正量进行多层递阶预报。该方法集多层递阶方法与回归分析二者的优点,既充分体现了高相关因子在预报模型中的作用,又能对时变系统具有较强的适应能力,同时又有较好的稳定性,决策变量与因变量之间不存在固定参数关系的动态系统。

## 1 多层递阶回归模型

该模型的基本数学模型设为

$$y(t) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \theta_i(t) x_i(t) + e(t) \quad (1)$$

式中: $\alpha_i$ 为回归系数; $\theta_i(t)$ 为时变参数; $e(t)$ 是随机噪声; $m$ 为预报因子数。

多层递阶回归分析方法的计算步骤:

(1)按照回归分析方法的计算步骤,分别求得各因子的回归系数 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ;将回归系数 $\alpha_i$ 与某对应的预报因子 $x_i(t)$ 相乘,并看成是一个新的因子 $x'_i(t)$ ,即:

$$x'_i(t) = \alpha_i x_i(t) \quad (2)$$

(2)将预报对象 $y(t)$ 减去回归方程得常数项 $\alpha_0$ 作为新的预报对象 $y'(t)$ ,即:

$$y'(t) = y(t) - \alpha_0 \quad (3)$$

将式(1)、(2)带入式(3),可得:

$$y'(t) = \sum_{i=1}^m \theta'_i(t) x'_i(t) + e(t) \quad (4)$$

(3)应用多层递阶方法的计算步骤对式(4)求解,其时变数递推公式为:

$$\theta'_i(t) = \theta'_i(t-1) + \frac{x'_i(t)}{\sum_{i=1}^m [x'_i(t)]^2} \left\{ y'(t) - \sum_{i=1}^m x'_i(t) \theta'_i(t-1) \right\} \quad (5)$$

(4)应用时变参数跟踪推算公式(5),可求得各新因子所对应的估值序列 $\{\theta'_i(t)\}$ ,再利用时间序列分析方法求得各时变参数预报值 $\hat{\theta}'_i(t)$ 。

(5)在上述计算基础上,可建立起多层递阶回归分析的系统状态预测方程:

$$y''(t) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i \hat{\theta}'_i(t) x_i(t)$$

## 2 计算实例

### 2.1 研究区概况

四平市市区位于松嫩盆地边缘东部,地理坐标为北纬 $43^{\circ}5'$ ~ $43^{\circ}13'$ ,东经 $124^{\circ}18'$ ~ $124^{\circ}28'$ ,面积约 $182 \text{ km}^2$ 。区内的主要开采含水层是白垩系碎屑岩孔隙裂隙承压水<sup>[4]</sup>。

四平市自1999年进入连年干旱少雨以来,水资源供需矛盾十分突出。全市按人均、亩均占有水资源量与全国和全省比较看,是水资源严重短缺地区之一。1997年二龙山水库未向城

市供水前,城市地下水开采强度很大。1998年二龙山水库供水后,通过实施取水许可制度,限量开采地下水,地下水开采量减少比较明显,地下水位有所恢复。到2003年随着水库蓄水量和可供水量锐减和水库水质污染加剧,地表水供水量大幅度减少,地下水开采量又有所增加。地下水由于连年集中开采,水量得不到有效补给,地下水位普遍下降。目前四平市城区已出现6个大的降落漏斗,漏斗中心区主要分布在:杜大城、河夹信子、纺织厂、红嘴子、联合化工厂、巨能药业—飞机场。

### 2.2 模型建立

由于多年超量开采,白垩系含水层已形成地下水漏斗。由于其埋藏较深,地下水的降水对其的影响比较缓慢,有滞后作用。因此,通过关联度分析,选取影响因素较大的因子。利用1989~2001年资料建立模型,用2001~2003年资料检验。回归计算的结果为:

$$h(t) = -0.00349P(t-2) - 0.011P(t-1) + 0.00386Q(t-1) + 0.00983Q(t) + 34.24$$

式中: $h(t)$ 为 $t$ 年漏斗中心年最低水位,m; $P(t-1)$ 、 $P(t-2)$ 为 $(t-1)$ 、 $(t-2)$ 年降水量,mm; $Q(t)$ 、 $Q(t-1)$ 为 $t$ 、 $(t-1)$ 年漏斗区地下水开采量, $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

回归方程显著性检验: $S_{\text{回归}} = 64.98$ , $S_{\text{误差}} = 2.72$ , $F_{0.05}(4,15) = 23.9$ , $(S_{\text{回归}}/k)/(S_{\text{误差}}/(n-k-1)) = 53.78 > 23.9$ 。因此,在显著水平为0.05时,该回归方程显著成立。回归方程的决定系数 $R^2 = 0.95$ ,因此认为该回归方程可用。

时变参数的初值采用回归系数, $\hat{\theta}'_1(0) = -0.00349$ , $\hat{\theta}'_2(0) = -0.011$ , $\hat{\theta}'_3(0) = 0.00386$ , $\hat{\theta}'_4(0) = 0.00983$ ,应用时变参数跟踪推算公式,求得各新因子所对应的参数值序列 $\{\hat{\theta}'_i(t)\}$ ,如表1。

对表1时变参数序列进行分析,采用适当的时间序列分析方法,计算出了2001~2003年的参数预报值,进而得到了2001~2003年的埋深预报,并与实测值比较,其结果见表2。

从表2可以看出,对四平市白垩系裂隙孔隙水漏斗中心年最低埋深的预报,在2003年的时候,预报误差比较大,达到0.68m,但是误差范围仍小于2%。其原因是四平市在1998年由二龙山供水之后,地下水开采量开始减少。但是在2003年又加大对其地下水的开采,开采量变化比较剧烈,因此预报精度有所下降。

因此,得到地下水埋深变化的模拟方程:

$$H(t) = -0.00349\hat{\theta}'_1(t-2)P(t-2) - 0.011\hat{\theta}'_2(t-1)P(t-1) + 0.00386\hat{\theta}'_3(t-1)Q(t-1) + 0.00983\hat{\theta}'_4(t)Q(t) + 34.24$$

地下水动态反映了地下水的收入与支出的变化情况。上面得到的模拟方程中,降水量代表了地下水系统的收入,开采量代表是地下水系统的支出,水位埋深变化则反映了收入与支出的差额。因此该模拟方程能很好的反映了人工开采条件的地下水系统变化情况。

### 2.3 应用模型进行地下水资源评价

首先,将不同开采量带入已建立的模型中,分析出在已开采量影响的基础上,模拟出过去时段地下水系统对不同假设开采量的响应程度。对过去时段地下水埋深的模拟,主要是为了

表 1 四平漏斗中心年最低地下水位埋深和年开采量以及时变参数表

| 年份   | 降水量<br>$P(t-2)/\text{mm}$ | 降水量 $P(t)/\text{mm}$ | 开采量<br>$Q(t-1)/10^4 \text{ m}^3$ | 开采量 $Q(t)/10^4 \text{ m}^3$ | 平均埋深<br>$h(t)/\text{m}$ | $\theta_1(t)$ | $\theta_2(t)$ | $\theta_3(t)$ | $\theta_4(t)$ |
|------|---------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1991 | 602.7                     | 626.8                | 1 865                            | 2 051                       | 51.17                   | -0.026 6      | -0.087 7      | 0.079 0       | 0.226 9       |
| 1992 | 626.8                     | 578.3                | 2 051                            | 2 022                       | 52.80                   | -0.035 4      | -0.113 4      | 0.110 9       | 0.307 1       |
| 1993 | 578.3                     | 495.6                | 2 022                            | 2 069                       | 54.55                   | -0.043 2      | -0.134 3      | 0.140 9       | 0.385 1       |
| 1994 | 495.6                     | 536.3                | 2 069                            | 2 390                       | 58.26                   | -0.048 2      | -0.151 5      | 0.164 2       | 0.453 7       |
| 1995 | 536.3                     | 649.3                | 2 390                            | 2 401                       | 58.09                   | -0.052 0      | -0.165 9      | 0.182 7       | 0.501 2       |
| 1996 | 649.3                     | 555.4                | 2 401                            | 2 409                       | 58.14                   | -0.056 0      | -0.176 6      | 0.199 0       | 0.542 8       |
| 1997 | 555.4                     | 496.7                | 2 409                            | 2 059                       | 58.37                   | -0.061 1      | -0.191 2      | 0.223 8       | 0.596 6       |
| 1998 | 496.7                     | 574.9                | 2 059                            | 1 554                       | 48.37                   | -0.062 9      | -0.197 5      | 0.231 8       | 0.612 1       |
| 1999 | 574.9                     | 668.9                | 1 554                            | 1 551                       | 47.04                   | -0.063 6      | -0.200 1      | 0.233 8       | 0.617 3       |
| 2000 | 668.9                     | 537.2                | 1 551                            | 1 401                       | 46.15                   | -0.064 9      | -0.203 5      | 0.237 3       | 0.625 2       |

表 2 四平漏斗中心地下水时变参数预报值与埋深预报值、预报误差值

| 年份   | 降水量<br>$P(t-2)/\text{mm}$ | 降水量<br>$P(t)/\text{mm}$ | 开采量<br>$Q(t-1)/10^4 \text{ m}^3$ | 开采量<br>$Q(t)/10^4 \text{ m}^3$ | 预测埋深<br>$h(t)/\text{m}$ | $\theta_1^f(t)$ | $\theta_2^f(t)$ | $\theta_3^f(t)$ | $\theta_4^f(t)$ | 实测埋深<br>$h(t)/\text{m}$ | 误差/<br>$\text{m}$ |
|------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| 2001 | 537.2                     | 440.0                   | 1 401                            | 1 580                          | 47.85                   | -0.067 6        | -0.204 5        | 0.239 6         | 0.720 9         | 47.56                   | -0.29             |
| 2002 | 440.0                     | 543.7                   | 1 580                            | 1 604                          | 47.59                   | -0.070 6        | -0.204 5        | 0.243 1         | 0.668 1         | 47.62                   | 0.03              |
| 2003 | 543.7                     | 574.139                 | 1 604                            | 1 855                          | 49.42                   | -0.073 1        | -0.204 4        | 0.245 5         | 0.670 5         | 50.10                   | 0.68              |

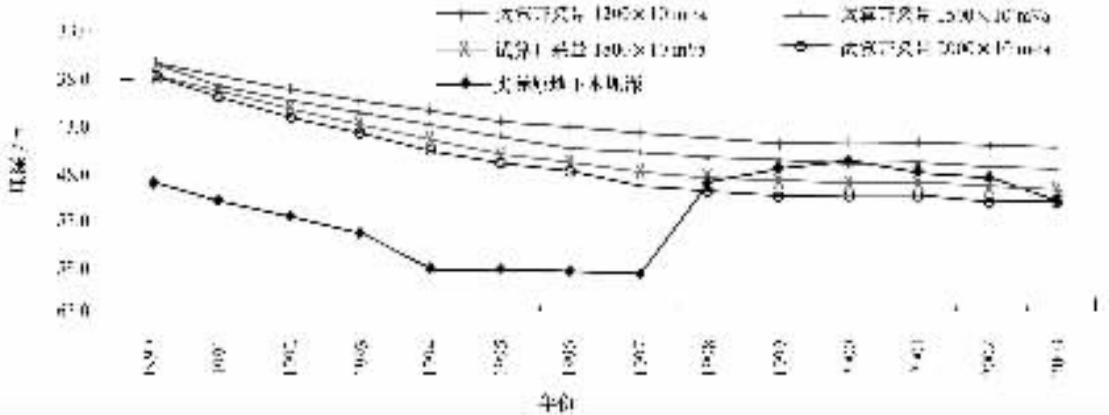


图 1 四平市地下水 1990~2003 年在不同开采条件下的埋深变化

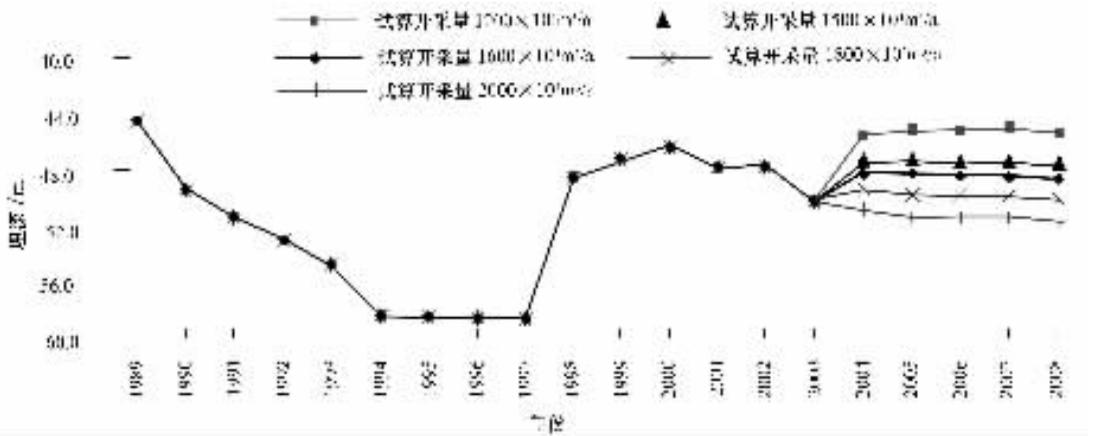


图 2 四平市地下水 2004~2008 年在不同开采条件下的埋深变化

查看在已受地下水开采的影响基础上,施加较小的开采量时,考查其地下水埋深的“上浮”程度如何;施加更大的开采量时,考查其地下水埋深的“下沉”程度如何。

水埋深曲线逐渐“上浮”,但是“上浮”程度并不相同。对于四平白垩系裂隙孔隙水,其含水层顶板埋深约在 48 m 左右。因此,可以大致推测开采量必须小于 1 800 万  $\text{m}^3/\text{年}$ ,地下水埋深曲线才有可能“上浮”到 48 m 的含水层顶板之上。(下转第 22 页)

从图 1 可以看出,随着假设开采量的减少,模拟得到的地下

g/L 咸水灌溉监测土壤盐分瞬时值,最高峰值为 0.232%,采用 10.13 g/L 咸水灌溉,土壤盐分最高峰值达 0.468%。因此,采用 6 g/L 以上矿化度较高咸水灌溉时,有一定风险。应慎用或采取咸淡轮灌的灌水方式,避免土层盐分瞬时峰值超过作物耐盐度。对大于 6 g/L 以上咸水,则不宜用于农田灌溉。

### 2.2.2 连续二年咸水灌溉土壤盐分周年变化趋势分析

由表 1,可以看出:小于 6 g/L 咸水灌溉,采用周年灌溉咸水二次(灌水定额 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),并通过二次常规淡水补充灌溉(播种底墒水、冬水、灌水定额 600 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),在无降雨补给时,经与灌前土壤含盐量本底值对照,第一年度咸水灌溉后,除 40 cm 以上表面耕层土壤略有增盐趋势外,但不超过 0.2%,40 cm 以下土壤盐分呈脱盐趋势,第二年度连续进行咸水灌溉后,1 m 土体土壤全部呈脱盐变化,恢复到本底值状态,甚至更好。这表明小于 6 g/L 咸水灌溉连续运行二年期间,只要进行冬灌、或有 60 mm 以上降水洗盐过程,1m 土体土壤含盐量可维持年际平衡,是安全的,可以周年连续运行。对于大于 6 g/L 咸水灌溉,则不尽然。耕层土壤盐分含量多出现超过 0.2%,土壤含盐量增幅明显,必须在原有淡水补充灌溉的基础上增加一次 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 淡水洗盐定额,才能保证二年连续咸水灌溉后土壤盐分恢复平衡。

由表 2,可以看出,对于不同矿化度的咸水灌溉,采取周年灌溉咸水 3 次,连续 2 年咸水灌溉的 1 m 土体含盐量总体变化趋势与周年灌溉咸水 2 次的 1 m 土体土壤含盐量变化趋势相同,主要区别是淡水恢复条件不同。小于 6 g/L 咸水灌溉 3 次,常规 2 次淡水补充灌溉,就能保证 1 m 土体盐分周年平衡。大于 6 g/L 咸水灌溉 3 次,耕层土壤显著积盐,峰值超过 0.25%以上,经加大淡水洗盐力度,通过汛期 150 mm 左右降雨补给(相当于 1 500 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 左右的淡水洗盐定额),才可保证土壤盐分恢复到本底值水平,否则难以保持 1 m 土体土壤盐分平衡。

## 3 淡水冬灌脱盐效果分析

咸水灌溉过程必然造成农田土壤积盐和累盐,要达到咸水

(上接第 18 页)

那么,利用上述的时间序列分析模型,预测出 2004~2008 年各时变参数估计值以及降水量,由此计算得到 2004~2008 年在不同开采条件下的地下水埋深趋势变化情况<sup>[5]</sup>。

从图 2 可以看出,当开采量超过 0.16×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a,地下水埋深超过了含水层顶板。因此,通过对过去时段以及未来时段不同开采条件的假设模拟,可以计算出四平市第四系孔隙地下水允许开采量为 0.16×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/年。

## 3 结 语

在获得的水文地质参数较少,对含水层内部结构尚未充分了解,较难以建立和应用解析法和数值法的确定性模型的情况下,就可利用长系列的地下水动态观测资料对区域地下水位进行预报,这是随机模型的一大优点。多层递阶回归模型是含时变参数的预报模型,由于它把地下水水位动态系统看成是一个时变参数系统,

安全灌溉,其关键在于土壤盐分动态变化峰值应控制在作物耐盐的安全允许范围内,并能恢复至初始水平,达到年际土壤盐分有升有降保持动态平衡。消除或减弱咸水灌溉造成土壤增盐的危害,除依靠汛期集中降雨进行脱盐恢复外,实施淡水冬灌进行脱盐恢复,是保证土壤盐分下移,恢复 1 m 土体土壤盐分平衡十分有效地安全保障措施。经对不同矿化度咸水灌溉进行 1 次冬灌土壤脱盐试验,脱盐效果显著,见表 3。由表 4 可以看出,3 种矿化度咸水灌溉后,经冬灌,1 m 土体土壤含盐量均呈脱盐趋势,1 m 土体含盐量均值脱盐率在 15%~20%之间。同一灌水定额冬灌条件下,低矿化度咸水灌溉土壤脱盐率高于高矿化度咸水灌溉土壤脱盐率。对于 1 m 土体除表层和底层土壤脱盐效果偏低或有增盐现象外,30~60 cm 埋深中层心土脱盐效果最好,脱盐率接近 40%。由此得出,咸水灌溉中,冬灌是确保土壤盐分安全最为有效的技术措施。

表 4 不同矿化度咸水灌溉冬灌脱盐效果表

| 咸水灌溉矿化度/(g·L <sup>-1</sup> ) | 土层深度/cm | 冬灌前土壤含盐量/% | 冬灌后土壤含盐量/% | 脱盐率/%  |
|------------------------------|---------|------------|------------|--------|
| 4.0                          | -5      | 0.055      | 0.056      | 0      |
|                              | -35     | 0.163      | 0.102      | 37.42  |
|                              | -65     | 0.153      | 0.125      | 18.30  |
|                              | -85     | 0.191      | 0.173      | 9.42   |
|                              | 均值      | 0.141      | 0.114      | 19.15  |
| 5.0                          | -5      | 0.076      | 0.051      | 32.90  |
|                              | -35     | 0.200      | 0.120      | 40.00  |
|                              | -65     | 0.246      | 0.178      | 27.64  |
|                              | -85     | 0.159      | 0.211      | -32.70 |
|                              | 均值      | 0.170      | 0.140      | 17.65  |
| 6.0                          | -5      | 0.050      | 0.066      | -32.00 |
|                              | -35     | 0.109      | 0.091      | 16.51  |
|                              | -65     | 0.138      | 0.088      | 36.23  |
|                              | -85     | 0.135      | 0.117      | 13.33  |
|                              | 均值      | 0.108      | 0.091      | 16.20  |

注:冬灌淡水灌水定额为 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

因而与客观实际较为符合,预报误差也相对较小,具有科学的概念背景。通过地下水多年实际已开采量资料来推算和检验允许开采量,由此得到的计算值有着更科学的依据<sup>[6]</sup>。

参考文献:

- [1] 韩志刚. 多层递阶方法理论与应用的进展[J]. 控制与决策, 2001, 16(2):129-132.
- [2] 杨金忠,蔡树英. 地下水动态预报的多层递阶组合模型[J]. 水科学进展, 1995,6(2):101-106.
- [3] 张子贤,卢宝林. 承压水漏斗水位预报的动态模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002,30(4):115-118.
- [4] 王凤生. 吉林省区域水文地质[R]. 长春:地矿部吉林地质矿产勘察开发局,1997.
- [5] 高正夏. 基于变值系统理论的地下水资源可持续开发研究[D]. 河海大学博士学位论文,2004.
- [6] 方燕娜. 多层递阶回归方法在地下水资源评价中的应用—以吉林中部平原区为例[D]. 吉林大学博士学位论文,2006.